

## РАСЧЕТ ОБДЕЛОК ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПОДВОДНЫХ ТОННЕЛЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ ПОРОД

*И.Ю. Воронина, ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», Россия*

В статье предложен новый метод расчета обделок параллельных некруговых подводных тоннелей, позволяющий исследовать влияние ползучести пород на напряженное состояние тоннельных конструкций, как в предположении водонепроницаемости пород, так и с учетом фильтрации воды вглубь массива. Учет реологических свойств пород осуществляется на основе теории линейной наследственной ползучести с использованием метода переменных модулей. Приводится пример расчета.

Строительство подводных тоннелей является перспективным способом преодоления водных преград и расширяет возможности транспортного тоннелестроения. Однако при проектировании подземных сооружений такой сложности помимо обычных нагрузок необходимо учитывать воздействие веса больших масс воды, заполняющей пересекаемый водоем, что существенно влияет на напряженное состояние тоннельных обделок и требует совершенствования теоретической базы их расчета.

В Тульском государственном университете разработан новый аналитический метод расчета обделок параллельных подводных тоннелей произвольного поперечного сечения на совместное действие собственного веса пород и давления воды на дно пересекаемого водоема, позволяющий определять напряжения, возникающие в конструкциях, как в предположении водонепроницаемости пород, так и в случае обводненного массива пород.

Разработанный метод развивает основные положения аналитического метода расчета обделок параллельных взаимовлияющих круговых подводных тоннелей [1] и метода расчета обделок параллельных некруговых тоннелей [2], учитывающего влияние земной поверхности.

Метод расчета параллельных некруговых подводных тоннелей основан на исследовании взаимодействия обделок и массива пород как элементов единой деформируемой системы и на аналитическом решении соответствующей плоской задачи теории упругости для полубесконечной весомой линейно-деформируемой среды, моделирующей массив, ослабленной несколькими любым образом расположенными отверстиями произвольной формы. Кольца разной толщины, подкрепляющие отверстия, выполнены из различных материалов и моделируют обделки тоннелей. Равномерно распределенная по всей границе полуплоскости нагрузка интенсивности  $P = -\gamma_w H_w$ , моделирующая давление воды на дно пересекаемого водоема, вызывает в среде однородное поле начальных напряжений  $\sigma_y^{(0)(0)} = \sigma_x^{(0)(0)} = -\gamma_w H_w$  ( $\gamma_w$  – удельный вес воды,  $H_w$  – глубина водоема). Как показано в работе [3], оба случая, когда массив пород считается водонепроницаемым и когда имеет место фильтрация воды через породы, сводятся к одной задаче теории упругости, расчетная схема которой представлена на рис.1. При этом суммарное поле начальных напряжений в среде  $S_0$ , моделирующей массив пород, определяется по формулам:

$$\sigma_x^{(0)(0)} = -[\lambda' \gamma' (H - y) + \gamma_w H_w], \quad \sigma_y^{(0)(0)} = -[\gamma' (H - y) + \gamma_w H_w], \quad \tau_{xy}^{(0)(0)} = 0 \quad (1)$$

$$\text{где} \quad \gamma' = \begin{cases} \gamma & \text{в предположении водонепроницаемости пород;} \\ \tilde{\gamma} + \gamma_w & \text{в случае обводненных пород,} \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda' = \begin{cases} \lambda - \text{в предположении водонепроницаемости пород;} \\ \lambda + (1 - \lambda) \frac{\gamma_w}{\gamma} - \text{в случае обводненных пород,} \end{cases} \quad (3)$$

$\gamma$  - удельный вес пород,  $H$  - глубина заложения первого из тоннелей, в центр которого помещено начало координат, под дном водоема,  $\tilde{\gamma}$  - удельный вес водонасыщенных пород с учетом взвешивающего действия воды,  $\lambda$  - коэффициент бокового давления пород в ненарушенном массиве.

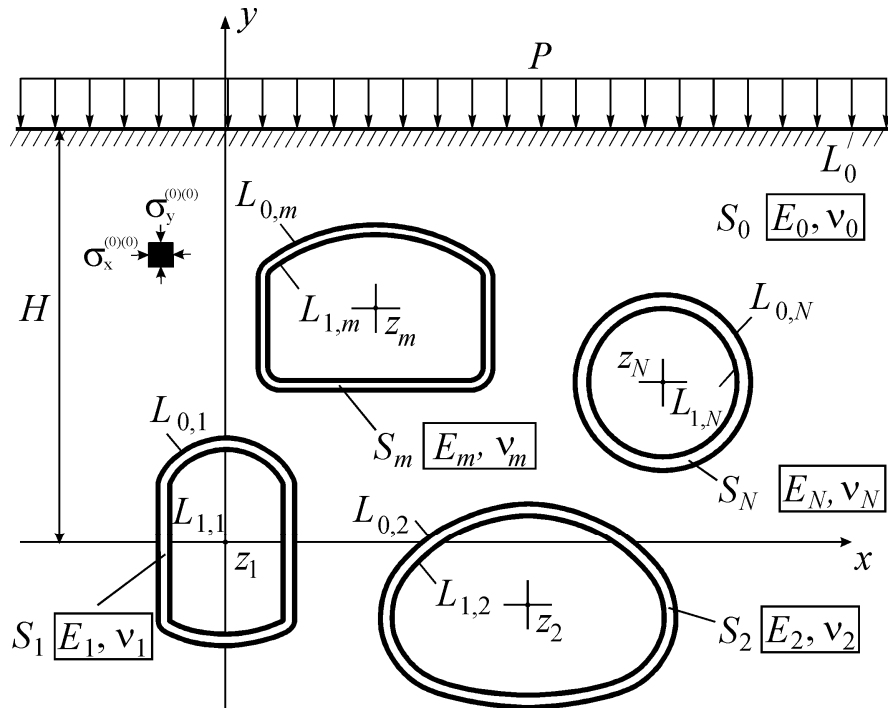


Рис.1. Расчетная схема

Считается, что среда  $S_0$ , моделирующая массив, и кольца  $S_m$  ( $m=1, \dots, N$ ), моделирующие обделки тоннелей, деформируются совместно, то есть на линиях контакта  $L_{0,m}$  ( $m=1, \dots, N$ ) выполняются условия непрерывности векторов напряжений и смещений. Внутренние контуры колец  $L_{1,m}$  ( $m=1, \dots, N$ ) свободны от действия внешних сил.

Для приближенного учета влияния расстояния  $l_{0,m}$  ( $m=1, \dots, N$ ) от сооружаемой обделки  $m$ -го тоннеля до забоя выработки полученные в результате решения задачи напряжения умножаются на корректирующие коэффициенты, которые в предположении водонепроницаемости пород определяются по формулам [4]:

$$\alpha_m^* = 0,6 \exp(-1,38 l_{0,m} / R_{0,m}), \quad (m=1, \dots, N), \quad (4)$$

где  $R_{0,m}$  ( $m=1, \dots, N$ ) - средние радиусы контуров  $L_{0,m}$ .

В случае обводненного массива пород полагается, что обделки сооружаются непосредственно у забоев, то есть принимаются  $\alpha_m^* = 0,6$  ( $m=1, \dots, N$ ). Обделки тоннелей считаются водонепроницаемыми.

Решение рассматриваемой задачи получено с использованием теории аналитических функций комплексного переменного [5], предложенного И.Г. Арамановичем аналитического продолжения комплексных потенциалов Колосова-Мухелишвили, регулярных в нижней

полуплоскости вне отверстий через границу полуплоскости [6], метода Д.И. Шермана [7] для определения напряженного состояния многосвязных областей, аппарата конформных отображений и комплексных рядов.

Ограничением рассматриваемой задачи является требование, чтобы окружности, описанные вокруг наружных контуров колец, не пересекались между собой и не касались границы полуплоскости.

Согласно подходу, предложенному в работе [8], решение задачи сводится к итерационному процессу, в каждом приближении которого используется решение задачи для одного кольца произвольной формы, подкрепляющего отверстие в полной плоскости, при граничных условиях, содержащих дополнительные слагаемые, отражающие влияние других подкрепленных отверстий и границы полуплоскости. Указанные слагаемые представляются в виде рядов Лорана, коэффициенты которых уточняются на основе предыдущих приближений.

Метод расчета реализован в виде компьютерной программы, позволяющей производить многовариантные расчеты обделок параллельных некруговых подводных тоннелей в целях практического проектирования.

Рассматриваемый метод позволяет учитывать влияние последовательности сооружения тоннелей на напряженное состояние обделок с использованием подхода, предложенного Н.Н. Фотиевой и А.Н. Козловым [9]. С этой целью последовательно рассматривается ряд частных случаев задачи, представленной на рис.1.

Влияние реологических свойств массива пород может быть учтено на основе теории линейной наследственной ползучести с использованием метода переменных модулей, согласно которому входящие в решение задачи теории упругости деформационные характеристики среды, моделирующей массив, представляются как функции времени [10]:

$$E_0(t) = \frac{E_0}{1 + \Phi(t)}, \quad \nu_0 = 0,5 - \frac{0,5 - \nu_0}{1 + \Phi(t)}, \quad (5)$$

где  $\Phi(t)$  - функция ползучести, определяемая соотношением

$$\Phi(t) = \frac{\delta t^{1-\alpha}}{1-\alpha}, \quad (6)$$

$\alpha, \delta$ -параметры ползучести, определяемые экспериментально (для большинства горных пород  $\alpha=0,7$ );  $t$  – время в секундах, отсчитываемое от момента  $t_0$  ввода обделки в работу.

При этом нужно учитывать, что смещения массива, развивающиеся до сооружения обделки, зависят не только от расстояния до забоя  $l_0$ , но и от времени  $t_0$ , проходящего между проходкой данного участка выработки и его креплением в рассматриваемом сечении.

Согласно работе [9], смещения, передаваемые на обделку со стороны массива в момент времени  $t_0 + t$  можно определить, введя в результаты решения плоской задачи корректирующий множитель  $\alpha^*$ , вычисляемый по формуле

$$\alpha^* = 1 - f(l_0) \cdot \frac{1 + \nu_0(t_0)}{1 + \nu_0(t_0 + t)} \cdot \frac{E_0(t_0 + t)}{E_0(t_0)}, \quad (7)$$

где

$$f(l_0) = 1 - 0,6 \exp(-1,38 l_0 / R_0). \quad (8)$$

В выражении (7) используются деформационные характеристики  $E_0(t)$ ,  $\nu_0(t)$ , определенные по формулам (5), (6), в моменты времени  $t_0$ ,  $t_0 + t$  вплоть до времени стабилизации деформаций, принимаемого равным 60 суткам.

Выше сказанное относится к каждой из обделок комплекса параллельных тоннелей, поэтому при расчете без учета влияния последовательности проведения тоннелей напряжения, полученные в обделке  $m$ -того тоннеля, умножаются на коэффициент

$$\alpha_m^* = 1 - f(l_{0,m})s_m(t), \quad (m = 1, \dots, N) \quad (9)$$

где

$$s_m(t) = \frac{1 + \nu_0(t_{0,m})}{1 + \nu_0(t_{0,m} + t)} \cdot \frac{E_0(t_{0,m} + t)}{E_0(t_{0,m})}, \quad (10)$$

$l_{0,m}$ ,  $t_{0,m}$  - соответственно расстояние до забоя и время ввода в работу обделки  $m$ -того тоннеля ( $m = 1, \dots, N$ ).

Коэффициенты запаса несущей способности обделок определяются по формулам

$$k_s^{(m)} = \min \left( \frac{R_{bc}^{(m)}}{|\sigma_{\theta max}^{(m)(c)}|}, \frac{R_{bt}^{(m)}}{|\sigma_{\theta max}^{(m)(t)}|} \right), \quad (m = 1, \dots, N), \quad (11)$$

где  $\sigma_{\theta max}^{(m)(c)}$ ,  $\sigma_{\theta max}^{(m)(t)}$  - соответственно максимальные сжимающие (отрицательные) и растягивающие (положительные) нормальные тангенциальные напряжения на внутренних контурах поперечного сечения обделок в интересующий момент времени  $t$ ;  $R_{bc}^{(m)}$ ,  $R_{bt}^{(m)}$  - расчетные сопротивления бетона при сжатии и растяжении.

В качестве примера, иллюстрирующего влияние ползучести пород на напряженное состояние тоннельных конструкций, рассматриваются обделки трех параллельных подводных тоннелей, расположенных в обводненном массиве пород с деформационными характеристиками  $E_0 = 3500$  МПа,  $\nu_0 = 0,27$ ; объемный вес пород  $\gamma = 0,02$  МН/м<sup>3</sup>, коэффициент бокового давления пород  $\lambda = 0,37$ ; удельный вес водонасыщенных пород  $\tilde{\gamma} = 0,017$  МН/м<sup>3</sup>, характеристики ползучести пород  $\alpha = 0,7$ ,  $\delta = 0,0018$  с<sup>-0,3</sup>. Глубина водоема в месте пересечения с трассой тоннелей  $H_w = 35$  м (удельный вес воды  $\gamma_w = 0,01$  МН/м<sup>3</sup>). Взаимное расположение тоннелей и размеры обделок показаны на рис.2.

Обделки выполнены из бетона с деформационными и прочностными характеристиками  $E_m = 30000$  МПа,  $\nu_m = 0,2$ ;  $R_{bc}^{(m)} = 14,5$  МПа,  $R_{bt}^{(m)} = 1,05$  МПа ( $m = 1, 2, 3$ ). Тоннели проводились одновременно с возведением обделок непосредственно в забоях выработок  $l_{0,m} = 0$  ( $t_{0,m} = 0$  при ( $m = 1, 2, 3$ )).

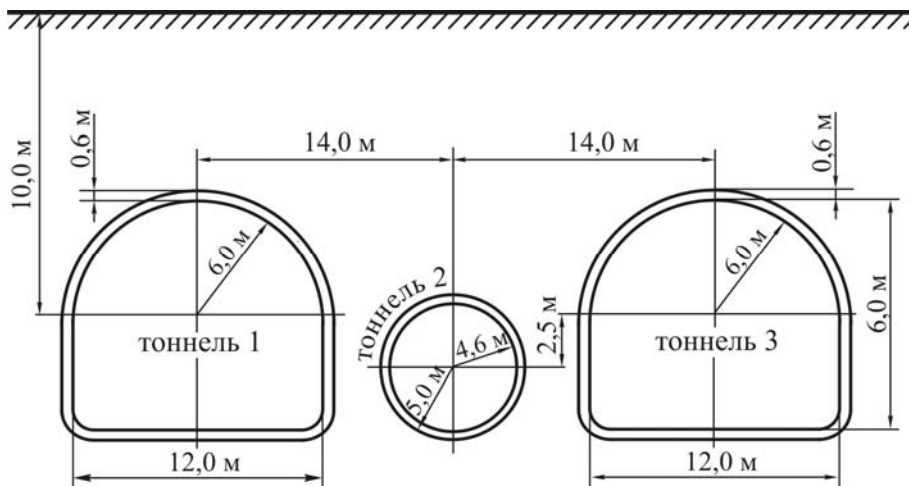


Рис.2. Расположение тоннелей и размеры обделок

На рис.3 сплошными, пунктирными и штрих-пунктирными линиями показаны эпюры нормальных тангенциальных напряжений, возникающих на внутренних контурах поперечных сечений обделок тоннелей соответственно в моменты времени  $t = 0, 30 \text{ сут.}, 60 \text{ сут.}$  (величины напряжений при  $t = 60 \text{ сут.}$  даны в скобках).

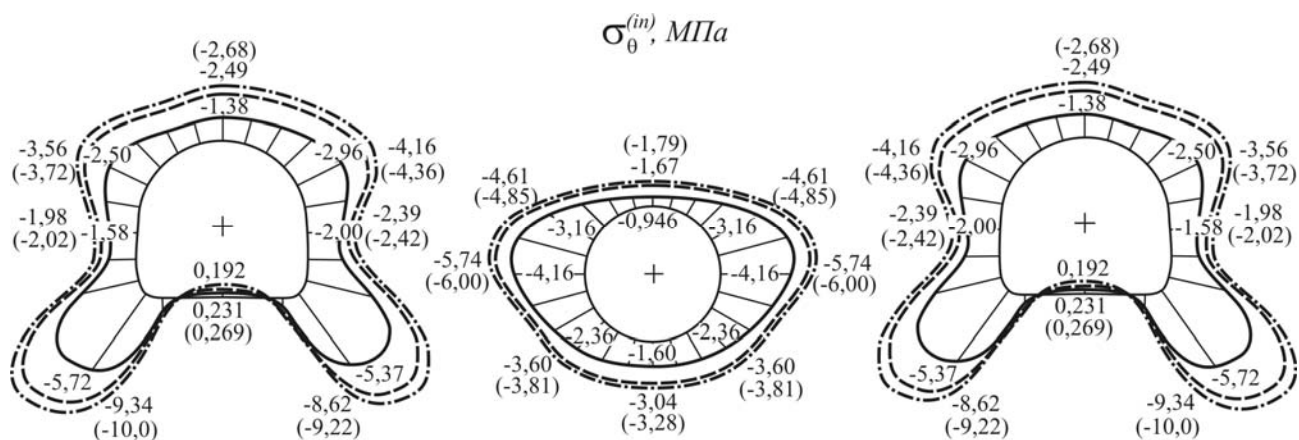


Рис.3. Эпюры напряжений  $\sigma_0^{(in)}$  (в МПа) в моменты времени  $t = 0, 30 \text{ сут.}, 60 \text{ сут.}$

Из рис.3 видно, что максимальные сжимающие напряжения возникают в угловых точках внутренних контуров поперечных сечений обделок боковых тоннелей, а в обделке сервисного тоннеля - в точках горизонтального диаметра. Небольшие растягивающие напряжения действуют в лотках обделок тоннелей 1 и 3.

Влияние ползучести пород приводит к увеличению максимальных сжимающих напряжений в обделках всех тоннелей и к моменту времени стабилизации деформаций ( $t = 60 \text{ сут.}$ ) это увеличение составляет 75% в обделках боковых тоннелей и 45% - в обделке сервисного тоннеля. В рассмотренном случае коэффициенты запаса несущей способности обделок составляют  $k_s^{(1)} = k_s^{(2)} = 1,45$ ,  $k_s^{(3)} = 2,42$ .

#### Список литературы

1. Fotieva N.N., Bulychev N.S., Sammal A.S., Voronina I.Y. Design of parallel mutually influencing undersea and under-river tunnel linings. Proc. of the ITA World Tunnel Congress 2003, Volume 2, Amsterdam, the Netherlands, p. 1123-1125.
2. Деев П.В. Расчет обделок параллельных тоннелей произвольного поперечного сечения, расположенных на небольшой глубине, на действие собственного веса пород// Вестник Тульского государственного университета. Серия Геомеханика. Механика подземных сооружений. Вып.1. – Тула, 2007 – с.21-28.
3. Воронина И.Ю. Математическое моделирование взаимодействия обделок параллельных подводных тоннелей произвольного поперечного сечения с окружающим массивом пород// Известия ТулГУ. Естественные науки. Серия Науки о Земле. Вып.4 – Тула: Гриф и К, 2009. – С.36-39.
4. Булычев Н.С. О расчете обделок тоннелей в очень слабых грунтах// Проблемы подземного строительства в XXI веке. Труды Международной конференции. - Тула, 2002. - С. 35-37.
5. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. - М.: Наука, 1966.
6. Араманич И.Г. Распределение напряжений в упругой полуплоскости, ослабленной подкрепленным круговым отверстием// Доклады АН СССР.- Вып. 104. - № 3. – 1955. - С. 372-375.
7. Шерман Д.И. О напряжениях в плоской весомой среде с двумя одинаковыми симметрично расположенными круговыми отверстиями// ПММ, т. XV. - Вып. 6. – 1951. - С. 751-761.
8. Fotieva N.N., Bulychev N.S. & Sammal A.S. Design of shallow tunnel linings. Proc. of the ISRM International Symposium EUROCK'96. - Rotterdam: Balkema, 1996. - P. 654-661.
9. Фотиева Н.Н., Козлов А.Н. Расчет крепи параллельных выработок в сейсмических районах. – М.: Недра, 1992. – 231 с.
10. Амусин Б.З., Линьков А.С. Применение метода переменных модулей для решения одного класса задач теории линейной наследственной ползучести// Известия АН СССР. Механика деформируемого твердого тела. - № 6. – 1974. - С. 162-166.